



## **PIEUX ECHANGEURS OU COMMENT SE CHAUFFER PAR LE BIAIS DES FONDATIONS D'UN BÂTIMENT**

Dr. A. Fromentin, Dr. D. Pahud  
EPFL - Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
LASEN - Département de génie civil  
1015 Lausanne, Suisse

### **RESUME**

Un pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, pour pouvoir faire circuler un fluide caloporteur qui permet d'échanger de la chaleur avec le sous-sol. Le système de pieux échangeurs, généralement raccordé à une pompe à chaleur, permet d'extraire la chaleur du sous-sol pour satisfaire des besoins de chaleur en hiver et d'y rejeter des charges thermiques issues de la production de froid en été.

Sur la base du programme de simulation dynamique TRNSYS, un tel système a été simulé et comparé avec des résultats de mesure d'une installation existante (Finkernweg, Kreuzlingen). Cette comparaison s'est avérée très bonne, et il en ressort déjà quelques règles élémentaires de dimensionnement, telle que la nécessité absolue de bien isoler le sous-sol des bâtiments dans de telles configurations.

### **ABSTRACT**

A heat exchanger pile is a pile foundation equipped with a channel system, so that a heat carrier fluid can be circulated in order to exchange heat with the surrounding ground. A set of heat exchanger piles, usually coupled with a heat pump, can be used for heating and/or cooling purposes.

This paper presents the results of measurements (the Finkernweg installation), compared to data predicted using a simulation model (TRNSYS). This comparison is very satisfactory, and some basic design rules can already be inferred, such as, for example, the absolute necessity of well insulating the basement of the building in such configurations.

## 1. INTRODUCTION

Un pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le sous-sol. Ses deux principales fonctions sont donc de reporter en profondeur les charges d'une construction et de servir d'échangeur de chaleur avec le terrain. Le système de pieux échangeurs, généralement raccordé à une pompe à chaleur, permet d'extraire la chaleur du sous-sol pour satisfaire des besoins de chaleur en hiver et d'y rejeter des charges thermiques issues de la production de froid en été.

La réalisation d'installations avec pieux échangeurs est relativement récente et leur caractérisation thermique demande encore à être évaluée. Le but de ce projet, financé par l'OFEN, est d'établir une série de règles simples nécessaires au bon dimensionnement d'un système "pieu échangeur - pompe à chaleur". Pour ce faire, le programme de simulation dynamique TRNSYS a été utilisé, dans lequel deux programmes (DST et SBM) permettant le calcul des transferts de chaleur résultants de l'utilisation d'un ensemble de sondes géothermiques ont été adaptés à la problématique présente. Ces simulations numériques sont ensuite calées et validées par comparaison avec des résultats de mesure de quatre installations existantes en Suisse.

Ce papier présente les résultats de la première étape de ce projet, c'est-à-dire la comparaison du modèle numérique avec l'installation de Finkernweg, bâtiments construits sur pieux échangeurs.

## 2. DESCRIPTION DU SYSTEME

L'installation Finkernweg est un groupe de bâtiments contigus destinés à abriter des logements, des bureaux et des locaux artisanaux. Situés à Kreuzlingen au bout du lac de Constance, les bâtiments sont construits sur 87 pieux de fondation de 12 m de longueur, en raison de la géologie locale (alluvions fluviales - sédiments lacustres fins) et de leur taille (jusqu'à trois étages sur rez-de-chaussée). La demande de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est mesurée à environ 200 MWh par an, soit près de 300 MJ/m<sup>2</sup>an pour une surface de plancher chauffée de 2'500 m<sup>2</sup>. Elle est couverte par un système monovalent, constitué par 3 PAC électriques de 30 kW thermique chacune (voir figure 1). Ces dernières extraient la chaleur du sous-sol par l'intermédiaire de 75 pieux de fondation équipés en pieux échangeurs: les pieux préfabriqués en béton, de section carrée de 30 cm de côté, contiennent 8 tubes en plastique de 20mm de diamètre fixés sur l'armature métallique du pieu et connectés en série. Un répartiteur permet de raccorder les pieux échangeurs en parallèle par série de deux. L'ensemble constitue ainsi un échangeur de chaleur souterrain de 825 m de pieu échangeur (11 m par pieu). Les tubes de connexion entre les pieux et les pompes à chaleur contribuent également à l'échange thermique avec une longueur totale de 780 m. Les pieux échangeurs délimitent un volume de terrain d'environ 12'000 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un espacement moyen de 3.8 m entre les pieux. Aucune recharge thermique du sous-sol n'a été prévue. L'installation a été mise en service l'été 1993.

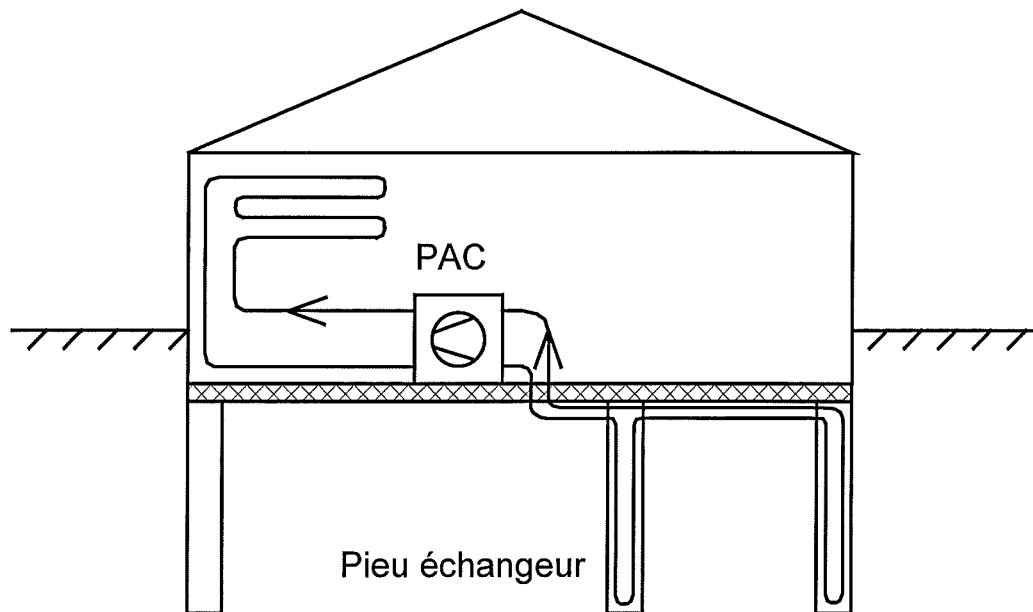


Figure 1: Illustration d'un système de chauffage avec pieux échangeurs

### 3. MODELISATION

Le programme de simulation dynamique TRNSYS 14.2 est utilisé pour le calcul des flux thermiques qui transitent par les différents composants du système. Sa structure modulaire permet d'adapter les outils de simulation à la configuration de l'installation étudiée, par l'assemblage adéquat des modules de calculs correspondants. Différents modules non standards de la librairie TRNSYS ont été utilisés pour cette étude spécifique; il s'agit d'un modèle de PAC (TYPE201), d'un modèle de stockage diffusif par sondes verticales adapté à la problématique des pieux échangeurs (TRNVDSTP), et d'un modèle de sondes géothermiques multiples (TRNSBM).

Le modèle de pompe à chaleur (PAC) utilisé dans YUM (Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating System), a été récemment intégré dans TRNSYS [1]. Ce module de calcul simule une PAC électrique air - eau, eau - eau ou saumure - eau. Les performances thermiques de la PAC sont calculées sur la base des tables données par le fabricant. Des constantes de temps à l'enclenchement et au déclenchement permettent de tenir compte des effets transitoires en régime non permanent.

Le système de pieux échangeurs peut être simulé par deux modules non standard, TRNVDSTP et TRNSBM. TRNVDSTP permet de simuler un stockage de chaleur dans le terrain avec un échangeur de chaleur souterrain (le système de pieux). Le volume de stockage a la forme d'un cylindre dont l'axe est vertical. Les pieux échangeurs sont supposés être uniformément placés à l'intérieur du volume de stockage. Le modèle simule le transfert de chaleur par convection du fluide caloporteur circulant dans les pieux, et le flux de chaleur par conduction dans le terrain. Pour les besoins de cette étude, l'influence d'un mouvement d'eau souterrain régional dans une couche

horizontale a été implémenté dans le module de calcul, de même que le transfert de chaleur des tubes connectant les pieux en surface [2].

Le programme de calcul SBM permet de calculer un ensemble de sondes géothermiques. Il a été intégré pour cette étude dans TRNSYS comme un module de calcul non standard (TRNSBM) [3]. Un mouvement d'eau souterrain régional, ou le transfert de chaleur causé par les tubes de connexion en surface ne peut pas être pris en compte. En revanche, la disposition exacte des pieux est simulée, ce qui permet d'évaluer l'influence de l'arrangement spatial des pieux par comparaison avec les résultats obtenus avec TRNVDSTP.

La caractérisation thermique des pieux est effectuée par l'outil de calcul MPC [4], qui utilise une solution analytique exacte pour le calcul du transfert de chaleur par conduction à l'intérieur d'un pieu. Les effets capacitifs des pieux sont pris en compte avec une combinaison appropriée des composants dans TRNSYS, et le transfert de chaleur échangé par les tubes de connexion entre les pieux et le répartiteur est traité par la méthode développée par Koschenz et Dorrer [5], qui permet de ramener le problème bi-dimensionnel du transfert thermique entre les tubes et le terrain à un problème à une dimension.

#### **4. COMPARAISON MODELE - MESURES**

Une campagne de mesure visant à déterminer les performances énergétiques de l'installation a été prise en charge par la maison NEK Umwelttechnik AG depuis mars 1994. Elle se poursuit encore actuellement pour observer les effets à long terme, qui, dans ce cas précis, se manifestent par un refroidissement progressif du sous-sol année après année. La période mesurée entre février et mai 1995 a été choisie pour confronter les modèles aux mesures, en raison du court pas de temps choisi pour enregistrer les mesures (10 minutes). Une analyse détaillée a été effectuée, qui a permis de caler séparément les modèles de pompes à chaleur et de pieux échangeurs, ainsi que d'établir une méthodologie pour l'estimation des paramètres nécessaires aux modèles [6].

Le modèle de pieu échangeur calé permet de prédire l'abaissement de température du fluide caloporteur année après année. Pour les années qui suivent les mesures, l'extraction de chaleur sur les pieux est définie par un profil mensuel répété d'année en année, basé sur les performances mesurées. La figure 2 permet de visualiser l'évolution de la température du fluide caloporteur sur une demi-douzaine d'années. Au delà de cette période, le régime transitoire devient négligeable et l'évolution des températures se répète d'une année à l'autre.

Compte tenu de la résistance thermique d'un pieu et de la puissance d'extraction imposée par les PAC, une température du fluide caloporteur inférieure à  $-4\text{ °C}$  peut conduire au gel du terrain sur le pourtour des pieux. Ce risque devient probable à partir de la cinquième année de fonctionnement, soit en 1998. Il aurait pu être évité par le biais d'une recharge artificielle du sous-sol pendant l'été.

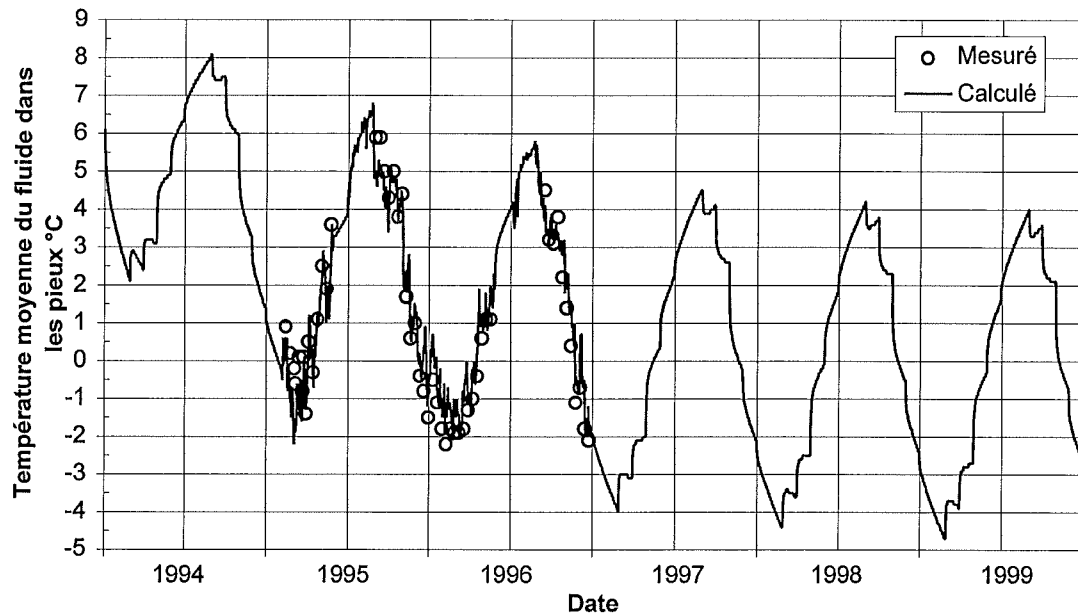


Figure 2: Evolution des températures moyennes calculées et mesurées du fluide caloporteur circulant dans les pieux échangeurs

Dans cette installation, une légère isolation sépare les zones chauffées des caves; cependant, aucune isolation n'a été placée entre les caves et le terrain. En conséquence, la température des caves est très basse, et les pertes par le sol des bâtiments sont sensiblement augmentées. Pendant la période de chauffage (d'octobre à mai), des simulations ont montré que les pertes du bâtiment par le sol sont environ deux fois plus grandes que dans la situation où l'on ne soutirerait pas de chaleur du sol. D'autre part, toujours pendant la saison de chauffage, la chaleur qui retourne dans le terrain par les caves représente plus de 40% de l'énergie extraite par les pieux échangeurs. Une bonne isolation sous les caves (avec 10 cm d'épaisseur effective) permettrait de réduire les pertes du bâtiment par le sol de plus de 20%; en revanche, le terrain ne serait plus aussi bien régénéré, et si la même quantité de chaleur était prélevée malgré tout, la température du fluide caloporteur dans les pieux pourrait passer au-dessous de  $-10^{\circ}\text{C}$  après 5 - 6 ans de fonctionnement. Une recharge thermique du sous-sol serait d'autant plus nécessaire, ce qui aurait également un effet bénéfique sur les pertes par le sol des bâtiments. Un système de chauffage avec pieux échangeurs devient plus attractif s'il peut être combiné avec une production de froid en été.

## 5. CONCLUSIONS ET DISCUSSIONS

Le programme de simulation dynamique TRNSYS, utilisé avec des modules de calculs non standards pour simuler une pompe à chaleur et un champ de pieux échangeurs, s'avère très performant pour simuler une installation avec pieux échangeurs, en raison de sa grande flexibilité et de sa capacité à calculer des variables avec une résolution temporelle très courte (quelques minutes) sur des périodes très longues (plusieurs années).

L'analyse des mesures effectuées sur une installation existante (Finkernweg) a permis de montrer que les modèles développés et utilisés permettaient de correctement recalculer les performances thermiques mesurées. Non seulement l'interaction thermique entre les pieux et les PAC peut être prise en considération, mais également l'influence des pieux sur les pertes thermiques du ou des bâtiments. Il ressort déjà de cette étude que l'isolation de l'interface terrain - bâtiment joue un rôle décisif sur une installation conçue comme celle de Finkernweg. Une bonne isolation est nécessaire pour éviter qu'une part trop importante de l'énergie extraite par les pieux ne retourne dans le terrain par la base du bâtiment. D'autre part une recharge artificielle du sous-sol devient nécessaire si sa régénération thermique naturelle est trop faible, ou, en d'autres termes, si l'apport de chaleur causé par un écoulement de l'eau souterraine est inférieur à celui qui est induit par la conduction de chaleur dans le terrain. Une recharge artificielle devient intéressante si elle peut être combinée avec une production de froid estivale. Dans tous les cas, les outils de simulation développés permettent de répondre aux questions que l'on peut se poser lors du concept et du dimensionnement d'une telle installation.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Office fédéral de l'énergie pour son soutien financier et la maison NEK Umwelttechnik AG pour la mise à disposition des données mesurées.

## REFERENCES

- [1] Afjei Th. et al. (1996), Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe; Phase 1: Machbarkeitsanalyse, Problemanalyse und Vorbereitung zum Bau eines Funktionsmusters, Schlussbericht, Bundesamtes für Energiewirtschaft, ENET-Nummer 9655701, Schweiz.
- [2] Pahud D., Fromentin A. and Hadorn J.-C. (1996), The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS Used for the Simulation of Heat Exchanger Piles. User Manual, Internal Report, LASSEN - DGC- EPFL, Switzerland.
- [3] Pahud D., Fromentin A. and Hadorn J.-C. (1996), The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM), User Manual for the November 1996 Version, Internal Report, LASSEN - DGC- EPFL, Switzerland.
- [4] Bennet J., Claesson J., Hellström G. (1987), Multipole Method to Compute the Conductive Heat Flows to and between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987, Depts. Of Building Physics and Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [5] Koschenz M. and Dorer V. (1996), Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling, Roomvent'96, 5<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan, July 1996.
- [6] Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. et Morath M. (1997), Recommandation pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme, Rapport intermédiaire, Office fédéral de l'énergie, Bern.